

陈小娜, 朱红生, 假冬冬, 等. 典型城市河道生态修复需水阈值计算方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 76-86. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.006

CHEN Xiaona, ZHU Hongsheng, JIA Dongdong, et al. Study on the calculation method of water demand threshold for ecological restoration of typical urban rivers[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 76-86. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.006

典型城市河道生态修复需水阈值计算方法研究

陈小娜^{1,2}, 朱红生³, 假冬冬^{1,4}, 费晓昕³, 王金洋^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 中冶华天工程技术有限公司, 江苏 南京 210019; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】针对城市河道水动力不足、水生态环境不稳定等问题,合理确定城市河道生态修复需水阈值是当前需解决的问题之一。为了分析城市河道不同时期水文水生态特点,探究现有生态流量计算方法适用性,【方法】基于这些方法针对流量资料缺乏的城市河道,提出一种较为科学的城市河道生态修复需水阈值综合计算方法,该方法推荐在汛期(5—9月)采用动态污染物稀释法和高水位堰流流量法,非汛期采用动态污染物稀释法和生态水力-生境法,并对湿周法进行改进,以验证结果的合理性。【结果】以马鞍山市芦塘支渠为例,量化得出生态修复需水的逐月过程线,汛期流量范围为0.139~0.429 m³/s,非汛期为0.073~0.295 m³/s。【结论】该阈值综合计算方法从城市河道实际修复需求出发,考虑水系连通、水质提升及水生生物等因素,相较于现有生态流量计算方法,此结果更具有综合性与适宜性,可为城市河道水资源高效利用提供科学依据。

关键词: 水生态环境; 生态需水; 城市河道; 流量阈值; 芦塘支渠; 综合确定方法; 径流; 水资源

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.006

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0076-11



Study on the calculation method of water demand threshold for ecological restoration of typical urban rivers

CHEN Xiaona^{1,2}, ZHU Hongsheng³, JIA Dongdong^{1,4}, FEI Xiaoxin³, WANG Jinyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. Institute of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. MCC Huatian Engineering & Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the role of sponge cities in mitigating urban waterlogging by selecting the Jincun development area of Jincheng City as a research area and analyzing the regulation effects of low impact development (LID)

收稿日期: 2024-03-17; 修回日期: 2024-05-16; 录用日期: 2024-05-21; 网络出版日期: 2024-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209501); 国家自然科学基金项目(52079080, U2040215); 南京水利科学研究院研究生学位论文基金项目(Yy224009)

作者简介: 陈小娜(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为河流动力学。E-mail: xnchen@hhu.edu.cn

通信作者: 假冬冬(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事河流海岸动力学研究。E-mail: ddjia@nhri.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

facilities on runoff and waterlogging at different spatial scales. [Methods] A coupled urban stormwater and waterlogging model was developed by integrating the Storm Water Management Model (SWMM) and the two-dimensional module of InfoWorks ICM. The model simulated various storm scenarios and LID layout schemes to analyze rainfall-runoff processes and waterlogging characteristics in plots, drainage zones, and regions. [Results] The findings indicated that LID facilities effectively reduced runoff peak values, decreased total runoff, accelerated runoff recession, and mitigated overflow nodes and overloaded pipe segments. They also significantly reduced areas affected by waterlogging and lowered water depths. The regulation effect of LID facilities showed minor variation across different spatial scales and performed well within a 1 to 5-year recurrence period. Specifically, under 1-year recurrence period rainfall, the largest LID layout scheme reduced surface runoff by more than 75%. [Conclusion] LID facilities demonstrate strong efficacy for short-recurrence-period storms but have limited capacity for long-recurrence-period waterlogging control, particularly at severe waterlogging points. Expanding the scale of LID facilities can substantially enhance their runoff regulation capacity.

Keywords: water ecological environment; ecological water demand; urban rivers; flow threshold; Lutang Branch Canal; comprehensive determination method; runoff; water resources

0 引言

河流生态需水是为维持河道内水生生物基本生存和栖息环境动态稳定,以及保护河道主要或基本生态环境功能不受破坏所需的最小用水量及其过程^[1-2]。随着城市化进程加快和经济社会的快速发展,受人类活动频繁影响,地表硬化面积增加^[3-4],各方面对水资源需求增大,出现城市河道水量逐渐减少^[5]、水动力不足^[6]、自净能力下降^[7]及黑臭水体^[8]等问题,河流生态环境健康及可持续发展问题日益严重^[9]。一系列研究表明^[10-13],通过引调水满足城市河道生态修复需水可以改善河道生态环境,因此深入研究城市生态修复需水阈值对于科学评估城市水环境质量、提高生态系统抗干扰能力、制定有效的水环境管理策略具有重要意义。

关于河流生态流量确定方法,根据理论依据、数据来源和方法过程等方面的差异,可将这些方法大致分为四大类,即水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体法^[14]。孔令刚等^[15]以石家庄市河流为例,根据多年月均流量过程计算河道生态基流年内变化情况,使用 Tennant 法设定分期验证合理性,计算结果满足河流生态目标需求。陶洁等^[16]运用多种方法,包含水文学法(改进年内展布法、RVA 法和 Lyon 法)及水力学法(湿周法和流速法),计算周口水文站河流断面的生态流量过程,分析各方法优劣性,并探讨其适用性,研究表明计算结果可满足水生态系统基本需求。冯颖璇等^[17]使用河流栖息地模拟法量化河流栖息地质量与径流条件之间的关系,来确定河流生态流量,该方法充分考虑了物种之间的相互作用对物种生长的影响,计算结果更为科学合理。王俊娜等^[18]以三峡水库及其坝下河段为例,采用整体法构建水

文-生态响应概念模型计算水文过程线,计算结果具有较好的合理性与可行性。综上所述,各种生态修复需水计算方法具有一定适宜性^[19]。

研究表明,水文学方法主要以河道多年历史流量资料为基础,具有计算简单、适用范围广等优点,但主观性强且依赖于经验,另外对数据要求较高,未考虑河流流量季节性变化^[20-21],适用于无特定保护物种,有历史水文数据的常年性自然河流;水力学法对数据要求不高,通过对河道实测数据计算水力学指标,建立指标与河道流量之间的关系,综合考虑河流水力特性和生态特性,但对河道年际内不同时期河道水生生物的需求考虑不足^[22],适合河床稳定的浅滩式河流;栖息地模拟法考虑栖息地特定保护目标物种,但栖息地随时间的动态变化分析尚不充分^[23],适用于存在特定保护物种、具有大量水文及生物数据的河流;整体法是将多种方法结合,以专家经验弥补水文资料缺失问题,强调维持自然流态的重要性,此方法优点是考虑因素全面、结果准确,有助于维护河流整个生态系统健康,但需长期观测流量大小变化且依赖多学科团队协作,方法较为复杂^[24],对于国内城市河流实际操作的可能性较低。综上所述,现有方法主要以河流的历史水文数据和自然参数为基础进行研究^[25],且研究对象主要针对物种多样性丰富的自然或半自然河湖,而对于缺乏长期水文和水生生态系统结构等资料的人工河流,尤其是渠道化严重、缺乏相应水文监测数据的城市河道而言,对河道水质、水系连通及景观功能等实际问题考虑尚不充分,实践应用范围与效果具有局限性^[26]。

城市河道相对于自然河道,在生态服务功能上存在一些差异,主要承担防洪排涝、景观娱乐等功能。为体现城市河道生态服务功能,需针对城市河道特

征, 从水生生物、水质需求及景观角度出发提出更为科学的计算方法, 为城市渠化河道生态修复研究提供技术支撑。

1 研究方法

城市河流不同于自然河流, 其主要有以下特征: (1) 水体流动性弱, 部分区域几乎处于静止状态, 易出现水质污染问题; (2) 在非汛期水资源缺乏情况下, 河流水位低, 存在断流现象; (3) 为合理利用和控制水资源, 城市河道中往往增设挡水建筑物, 增加水体的滞留时间; (4) 部分城市河道在计算生态修复需水时缺乏相应水文监测历史实测流量、水位数据支持。城市生态修复需水的目的是维持一定的水位和流速, 保障河道连通性、河流自净能力及水生生物生存繁殖, 同时防止藻华发生。城市河道水深变化影响水文横向和纵向的连通性^[27], 流速变化显著影响河道水体自净能力及藻类生长情况。基于城市河道特征, 确定城市河道生态修复需水阈值过程如图 1 所示。

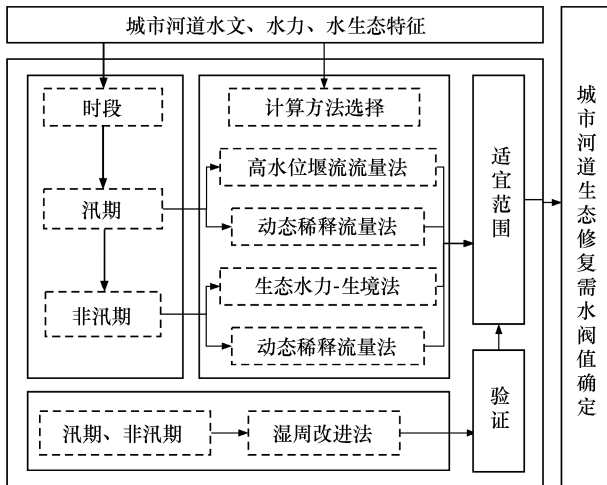


图 1 城市河道生态修复需水阈值综合确定方法

Fig. 1 Comprehensive determination method of water demand threshold for ecological restoration of urban river

针对城市河道特征, 综合考虑河流生态系统的用水需求、水文条件、水力栖息地、河流生境之间的关系, 提出一种综合性生态修复需水阈值计算方法。城市河道水质差, 雨水非点源污染问题凸显, 采用动态稀释流量法计算污染物稀释用水需求, 考虑污染物对流与扩散过程, 选取氨氮、总磷和化学需氧量作为污染物代表, 建立一维水质模型进行生态修复需水计算。汛期在保证水质良好条件下还需满足水系连通性, 河道下游水位需高于挡水建筑物高度, 根据河道生态需水设计堰流水深以及下游河段流速, 采用矩形薄壁堰堰流公式计算河道修复需水流量。非汛期除水

质问题外, 还需考虑河道景观功能以及生境功能, 采用生态水力-生境法, 将城市河道水生生物在不同时期所需水深、流速等河道水力建立联系并计算所需流量。

2 实例应用计算

2.1 典型城市实例研究区域概况

安徽省马鞍山市位于长江水系流域, 地表水和地下水资源丰富。市中心城区位于长江东岸, 由两条主要的防洪河道-慈湖河和采石河穿过, 河道由闸门与长江连接。此外, 市内还有众多自然内河水系, 如雨山河、永丰河以及黄家塘水系等, 通过排涝泵站与长江、采石河以及慈湖河连接, 在城市排涝和防洪方面起着关键作用。

本文以马鞍山市雨山区芦塘支渠为研究区域, 位于市中心城区西南部(见图 2), 地理位置为(31°39'30"N, 118°29'48"E), 为黄家塘水系一支流, 流向为自东向西, 东起点为湖西路, 西至红旗路。

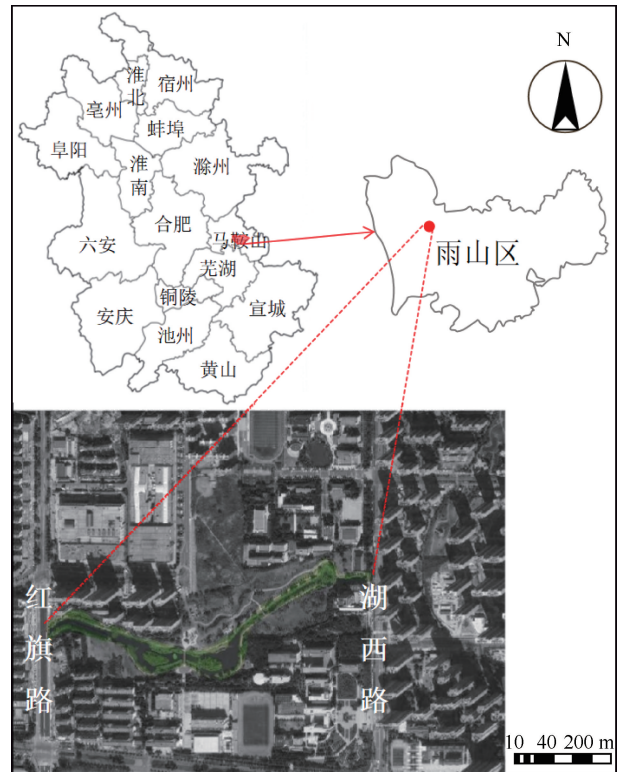


图 2 研究区域概况

Fig. 2 Overview of the study area

芦塘支渠总汇水面积为 1.39 km², 上游段长约 943 m, 流域平均宽度为 0.8 km, 河道平均坡降为 0.5‰, 通过黄家塘下游四喜桥泵站将水排至采石河, 最终流入长江。芦塘支渠断面为梯形渠化河道, 具有硬质化率高、水系连通性差、外源污染众多及水体流

动性差等城市河道典型特征。

2.2 生态修复需水阈值计算

根据图1综合确定方法, 采用污染物稀释流量法计算汛期与非汛期生态修复需水下阈值, 满足河道水质改善需水量; 汛期上阈值需满足堰流流量计算结果, 维护河道水系连通及防止藻华问题发生, 非汛期采用生态水力-生境法以满足水生物生存基本要求和景观功能, 最终得到综合生态修复需水阈值, 通过湿周改进法对上述结果进行验证并作适宜性分析。

2.2.1 汛期(高水位状态)堰流流量法

本文研究对象为城市河道, 季节分明, 为保证河道在不同时期维持所需生态修复需水流量, 合理利用和调控水资源, 在河道末端设置薄壁堰(见图3), 以便在汛期洪水来临时向下游宣泄洪水, 在非汛期时保证河道基本水量需求。

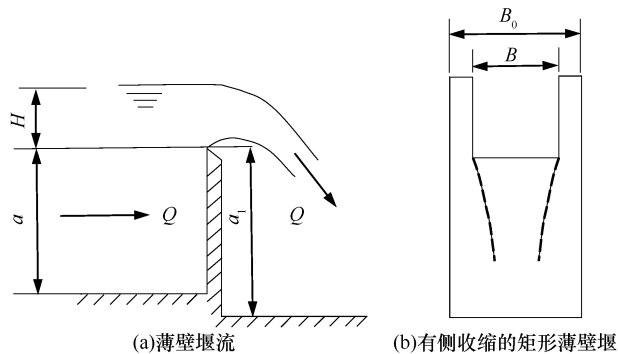


图3 矩形薄壁堰

Fig. 3 Rectangular sharp-crested weir

通常下游河段平均流速低, 水深大, 为抑制藻类增殖, 需满足下游河段流速大于藻类生长临界值^[28-29](0.10~0.15 m/s), 据河道生态水设计堰流水深以及下游河段流速, 采用矩形薄壁堰堰流公式计算河道需水流量, 计算公式为

$$Q = C_1 B H^2 = m_0 B \sqrt{2g} H^2 \quad (1)$$

式中, B 为堰宽(m); H 为堰上水头(m); C_1 为实际包含 $\sqrt{2g}$ 、侧收缩系数在内的综合流量系数。

将行近流速 v_0 及侧收缩影响并入到流量系数 m_0 中去考虑。根据堰上水头 H 以及上游堰高 a 数值范围, 板谷-手岛公式可满足适用条件, 计算公式为

$$m_0 = 0.4032 + \frac{0.00666}{H} + 0.0534 \frac{H}{a} - 0.0967 \sqrt{\frac{(B_0 - B)H}{B_0 a}} + 0.00768 \sqrt{\frac{B_0}{a}} \quad (2)$$

由公式(1)可知, 流量 Q 随堰上水头 H 变化而变化, 而 H 大小取决于堰上断面水位 Z , 因此 Q 和 Z 是一对一函数关系。由于实测数据有限, 首先建立上游堰上水位与式(1)中系数 C_1 的关系, 如图4(a)所示, 再通过 C_1 计算流量, 最后将 Q 与 Z 的对应值点绘成 $Q-Z$ 曲线, 并绘出 $Q-v$ 曲线, 如图4(b)所示。

当下游堰上断面流速处于 0.10~0.15 m/s 时对应流量为 0.080~0.429 m³/s, 此时对应堰上水位为 5.75~5.87 m。

2.2.2 生态水力-生境法

城市河道生态功能在维护河流基本防洪、排涝等方面前提下, 适宜水位和流速是维护河道生态系统平衡的必要条件。芦塘支渠无特定动植物保护目标, 但为全面构建完整水生态体系, 河道内种植多种水生植物(见表1)。

此外, 芦塘支渠投放了鲫鱼、麦穗鱼及泥鳅等水生动物。根据有关研究^[30], 鱼类适宜生存水深与其体长之间有着密切关系, 最小水深应为体长的3倍。本文将城市河道水生生物在不同时期所需水深、流速(见表2)和河道水力要素联系起来计算生态修复需水流量。

最终选取汛期生态流速 v_e 为 0.10~0.15 m/s, 非汛期为 0.05~0.10 m/s, 拟定汛期(5—9月)生态水深为 0.50~1.00 m, 非汛期(10月—次年4月)为 0.20~0.80 m 进行计算。此外, 为避免断面尺寸不同

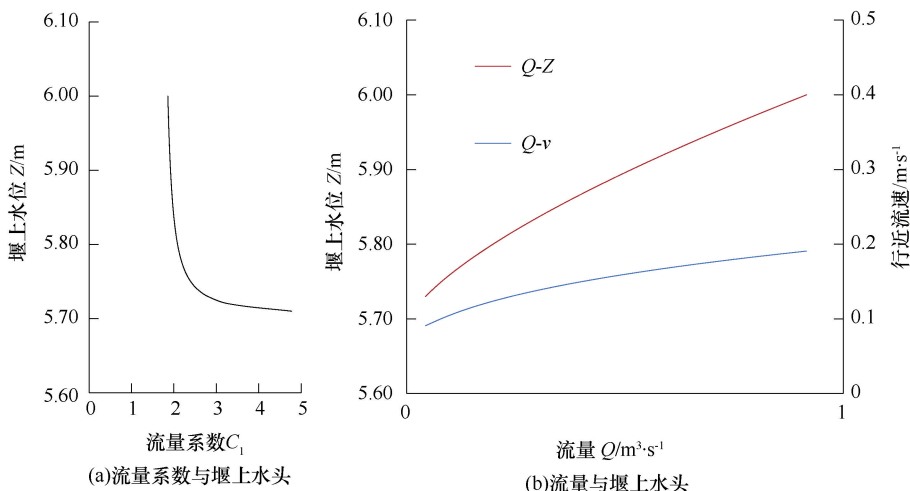


图4 流量与堰上水头关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between flow and weir head

表1 水生植物适宜种植深度

Table 1 Suitable planting depths for aquatic plants

类型	植物名称	生育期	水深范围/cm
浮叶型	睡莲	多年生	20~80
	萍蓬草	多年生	20~50
挺水型	水生美人蕉	多年生	20~50
	鸢尾	多年生	≤20
	千屈菜	多年生	20~50
	芦苇	多年生	20~80
	再力花	多年生	20~50
	梭鱼草	多年生	≤20
	翠芦莉	多年生	20~50
	香蒲	多年生	20~50
	荷花	多年生	20~80
沉水型	苦草	多年生	20~80

表2 水生动物最小水深以及流速

Table 2 Minimum water depths and flow velocities for aquatic animals

生物名称	最小流速/ $m \cdot s^{-1}$	体长范围/m	最小水深/m
鲫鱼	0.10~0.30	0.05~0.32	0.15~0.96
麦穗鱼	0.05~0.20	0.04~0.10	0.30~0.80
泥鳅	0.05~0.15	0.08~0.15	0.45~0.90

引起的误差, 选取四个断面 F1、F2、F3、F4 (见图5) 进行计算。

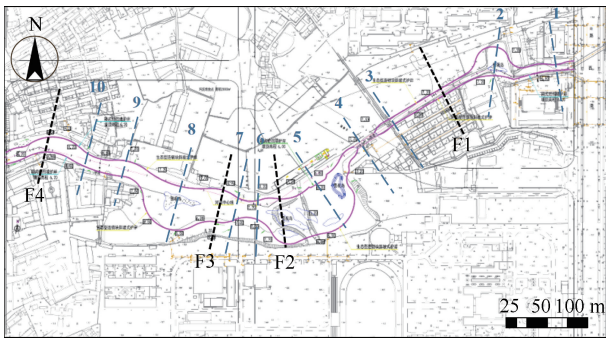


图5 选取断面位置

Fig. 5 Selected cross-section locations

计算不同水位不同断面下的流量 Q 、平均流速 \bar{v} 值并绘制 $h-Q-\bar{v}$ 关系曲线 (见图6), 求取水深、流速范围内对应的流量区间, 计算公式为

$$Q = AC\sqrt{RJ} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} A_i J^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{J}(ah + mh^2)^{\frac{5}{3}}}{n(a + 2\sqrt{1 + m^2}h)^{\frac{2}{3}}} \quad (3)$$

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{(ah + mh^2)} \quad (4)$$

式中, R 为河道断面水力半径 (m); m 为边坡系数, 取值 2.5; n 为河道糙率, 取值 0.025; \bar{v} 为断面平均

流速 (m/s); J 为所研究对象水面坡度, 取值 5×10^{-5} ; A_i 为过水断面面积 (m^2); a 为选取梯形断面底宽度 (m); Q 为断面过水流量 (m^3/s)。

选取各断面计算均值作为生态修复需水流量, 非汛期计算结果为 $0.076 \sim 0.295 m^3/s$, 汛期为 $0.201 \sim 0.420 m^3/s$ 。

2.2.3 污染物稀释流量法

城市河道生态修复需水阈值需考虑污染物稀释流量。根据马鞍山总体规划中关于水环境功能区划, 芦塘支渠水质管理目标为IV类。污染物稀释自净需水流量利用一维水质模型进行估算, 计算公式为

$$WC_1 + \int_{t_1}^{t_2} Q_i C_i - Q_e C_e dt = WC_2 \quad (5)$$

C_e 浓度变化可满足一级反应方程式, 即

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (6)$$

式中, W 为河道自身水量 (m^3); Q_i 为上游入流流量 (m^3/s); Q_e 为下游出流流量, 本文设定上下游出入流流量平衡 (m^3/s); C_1 为河道内水体污染物浓度 (mg/L); C_i 为生态补水水体污染物浓度, 文中选取II类水浓度 (mg/L); C_e 为下游出流水体控制浓度, 需满足IV类水要求 (mg/L); C_2 为河道生态补水后水体污染物浓度 (mg/L), 需符合IV类水要求。

根据芦塘支渠水体取样原始数据进行污染物稀释自净需水流量计算, 水泵每天运行 12 h, 河道内换水用时设计 8 种工况 (1~8 d), 结果表明氨氮 (NH_3-N) 所需稀释水量最大, 为满足所有污染物项目均能达到水质要求, 则在汛期需调度流量至少为 $0.139 m^3/s$, 非汛期 $0.073 m^3/s$ 。

3 结果讨论

3.1 典型城市河道生态修复需水计算结果

将以上多种方法计算得到的生态修复需水过程外包线设定为城市河道生态修复需水阈值的上下限。芦塘支渠汛期 (5—9月)、非汛期 (10月—次年4月) 的生态修复需水下阈值分别为 $0.139 m^3/s$ 和 $0.073 m^3/s$, 上阈值为 $0.429 m^3/s$ 和 $0.295 m^3/s$ 。该法计算的生态修复需水阈值有助于维护城市河道功能的稳定, 促进水系连通、水质提升, 且保障水生生物的生存不会受到威胁。

3.2 阈值合理性分析

在四种常用生态流量计算方法, 即水文学方法、水力学方法、栖息地模拟法和整体法中, 后两者的使用通常需要大量的人力物力, 相较于水文学方法和

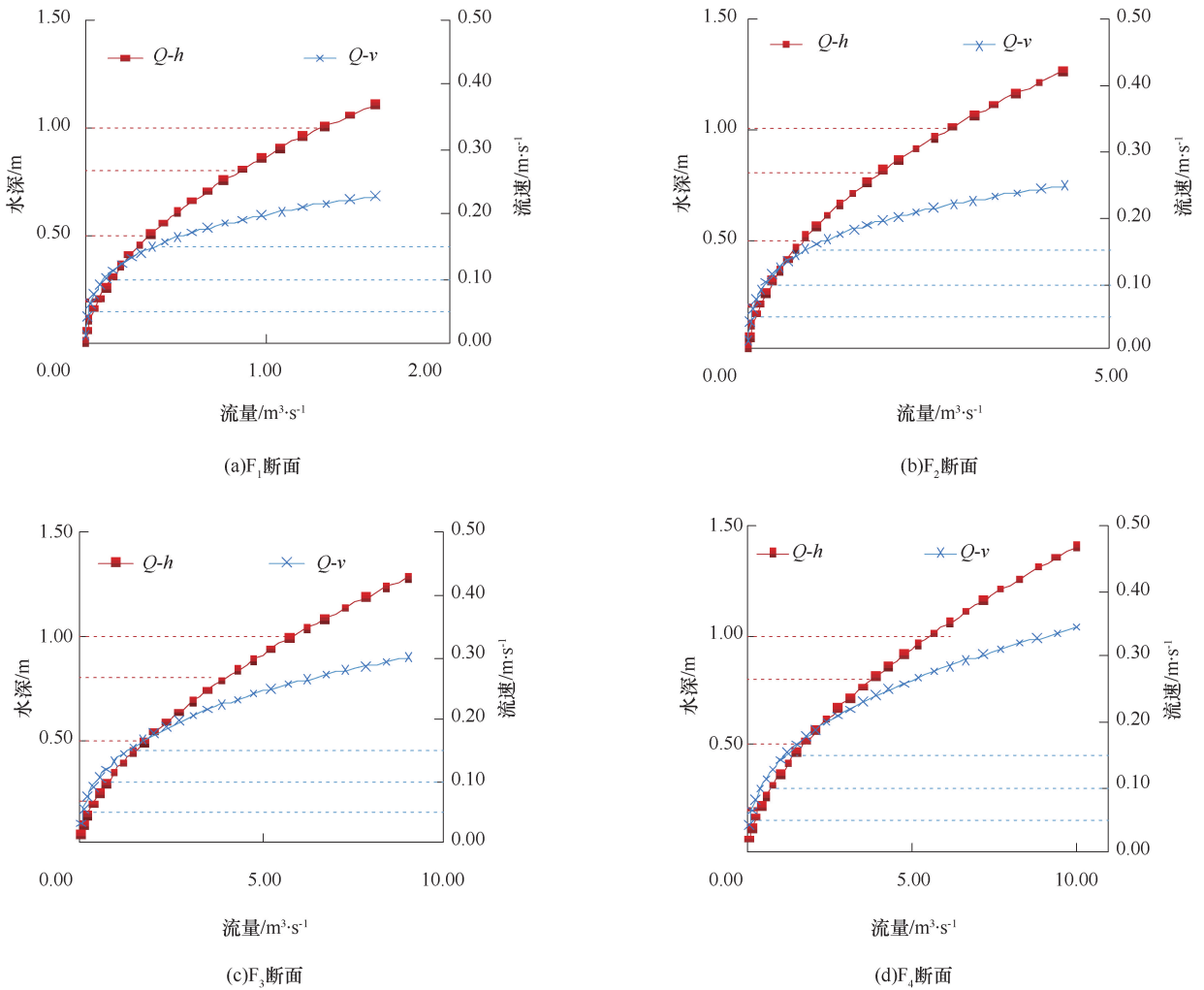


图 6 各断面水深-流量-流速关系曲线

Fig. 6 Water depth-flow-velocity relationship curves of each section

水力学方法, 操作较为复杂。然而, 对于缺乏必要的历史流量监测资料、季节性的城市河道, 水文学方法适用性相对不高。综合考虑不同计算方法特点以及适用性和工程实用性, 选择水力学方法中的湿周法对城市河道生态修复需水阈值计算结果进行校核。利用湿周法进行计算, 首先需建立湿周与河道流量之间的相关关系, 其次根据水力参数与河道流量之间的关系曲

线, 确定曲线突变点相对应的河道流量作为生态修复需水的标准。针对城市河道丰枯明显的特点, 以不同时期不同水位代表河道丰枯季节性变化, 采用人工设定水位计算序列分析断面不同水位下湿周与流量之间的关系。城市河道渠化现象严重, 断面为标准的等腰梯形断面, 如图 7 所示。

由曼宁公式以及谢才公式推出断面流量 Q 与湿

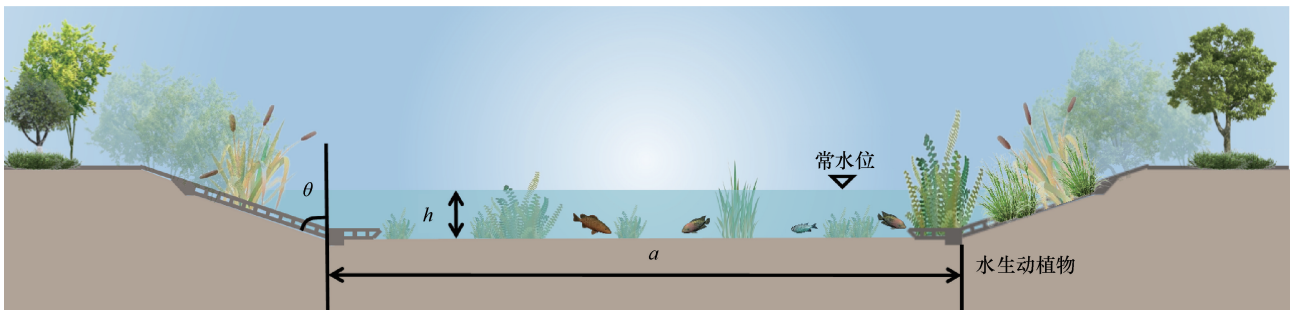


图 7 河道断面示意

Fig. 7 River cross-section diagram

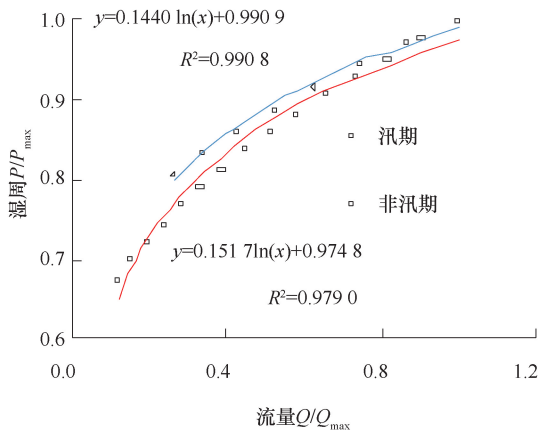
周 P 之间的关系结果为

$$Q = \frac{\sqrt{J} \left[\frac{a(P-a)\cos\theta}{2} + \frac{(P-a)^2\sin 2\theta}{8} \right]^{\frac{5}{3}}}{nP^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

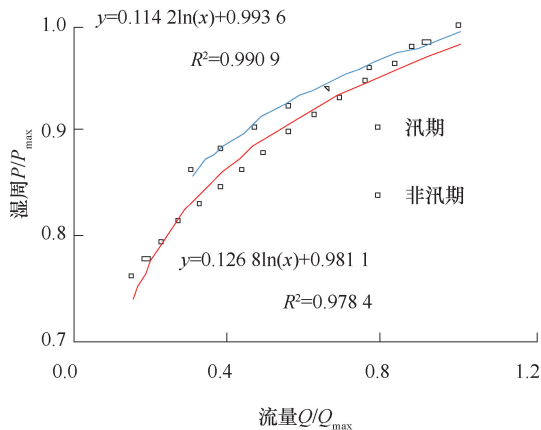
式中, a 为断面底宽(m); θ 为边坡与垂线的夹角($^{\circ}$), 根据坡比系数得出 $\sin\theta=0.928$, $\cos\theta=0.371$;

J 为所研究对象水面坡度, 取值 5×10^{-5} ; n 为河道糙率, 取值 0.025; P 为断面湿周(m)。

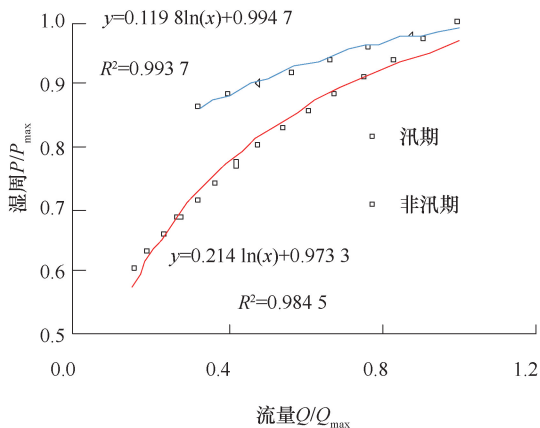
本文选取 10 个断面(见图 5 中 1—10 断面), 采用曲率最大法确定城市河道汛期与非汛期生态修复需水流量临界点, 对应点即为相对生态修复需水流量, 进一步平均计算得出生态修复需水, 如图 8 所示。



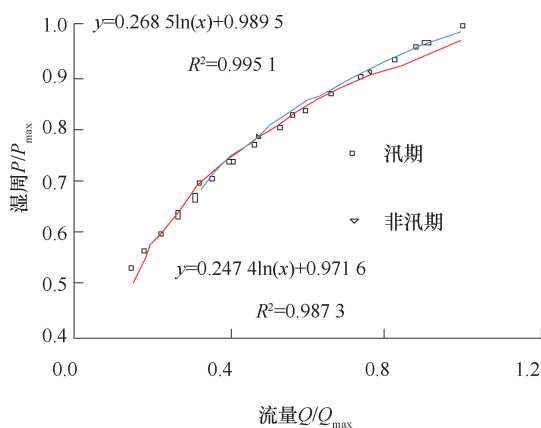
(a)断面1



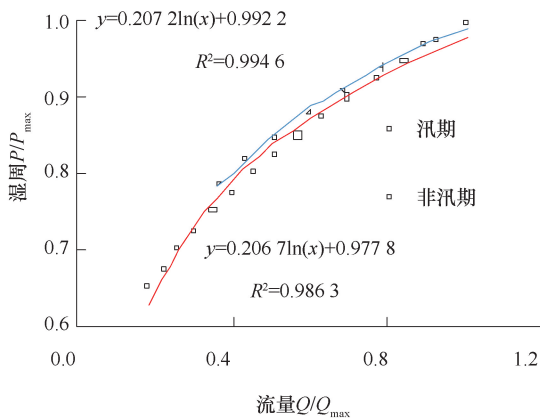
(b)断面2



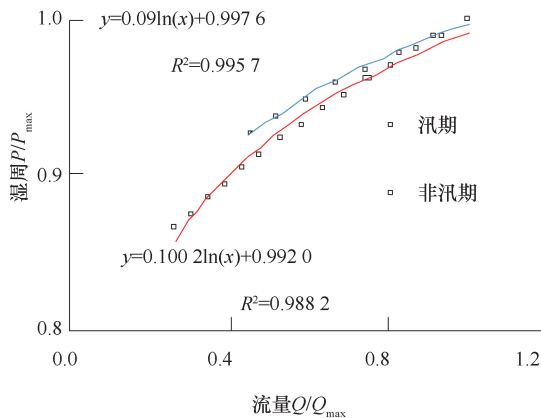
(c)断面3



(d)断面4



(e)断面5



(f)断面6

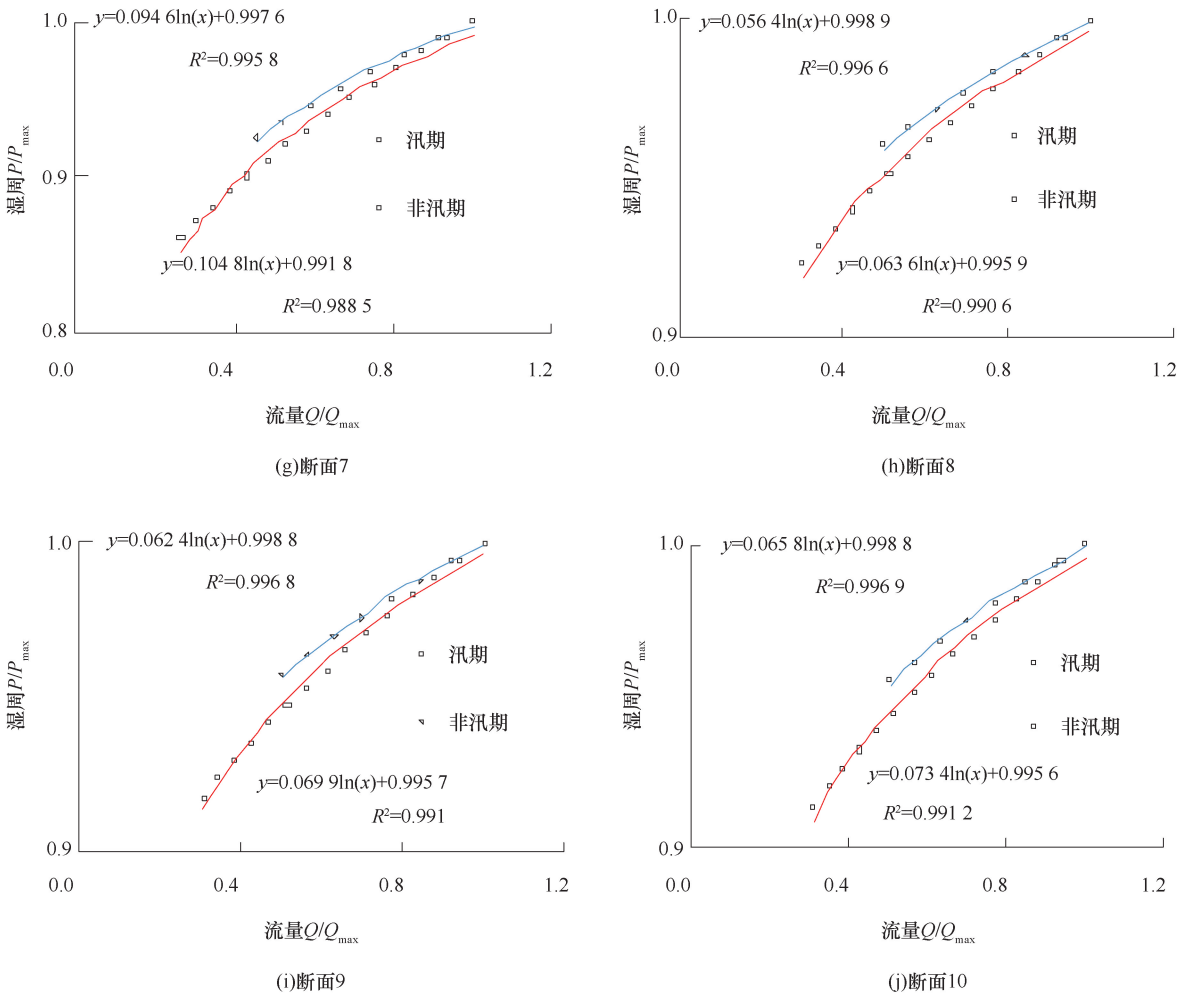


图8 各典型断面的湿周-流量关系曲线

Fig. 8 Wetted perimeter flow relationship curves of typical sections

梯形断面湿周-流量关系曲线公式为对数函数的拟合程度较高^[31],为消除坐标尺度对分析的影响,本文对流量以及湿周进行无量纲化,拟合曲线关系式为 $P/P_{max}=a\ln(Q/Q_{max})+b$ 。湿周法通常采用斜率为1法及曲率最大法来确定生态修复需水流量临界点,前者估算结果大于后者,其中两者关系为 $Q_s=1.414Q_c$,这种差异主要由于拟合函数形式影响。本文使用人为设定流量序列试算,斜率为1法的拟合曲线难以呈现出明显的突变性,相比之下,曲率最大法的结果更容易反映出潜在变化点的意义^[32-33]。计算得出马鞍山芦塘支渠生态修复需水汛期为 $0.357\text{ m}^3/\text{s}$,非汛期 $0.146\text{ m}^3/\text{s}$ 。

城市河道生态修复需水阈值和湿周改进法所得生态修复需水计算结果整体趋势相符,湿周改进法计算结果在综合法所得适宜阈值内(见图9)。该阈值综合算法以满足城市河道生态功能,即水系连通、水质提升和水生生物生存为基础进行

生态修复需水计算,相对于湿周法优点在于:(1)考虑了城市河道特征及景观需求;(2)维护生物栖息地的完整性,根据实测断面资料建立平均生态流速-平均生态水深与流量之间的关系;(3)易于管理流量调控,可根据研究河段连通水位、水质要求来确定生态修复需水流量。

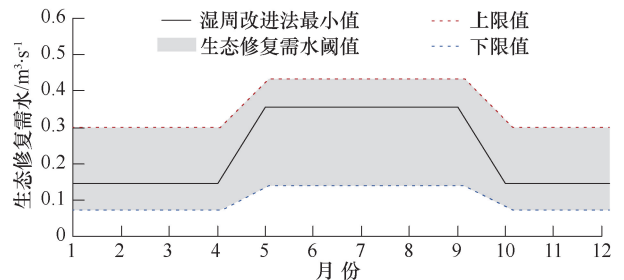


图9 城市河道生态修复需水阈值综合确定值

Fig. 9 Comprehensive determination values of water demand threshold for ecological restoration of urban river

3.3 阈值效果分析

芦塘支渠上游泵站规模最大为 $25\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$, 根据生态修复需水阈值计算结果, 对芦塘支渠进行调控方案设计, 结果表明生态补水措施增大了河道整体流速, 在 $0.096\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.193\ \text{m}^3/\text{s}$ 及 $0.289\ \text{m}^3/\text{s}$ 三种工况下, 相比补水前水体流速分别提升 $0.002\ \text{m}/\text{s}$ 、 $0.003\ \text{m}/\text{s}$ 、 $0.005\ \text{m}/\text{s}$ 。同时河道水质指标均达到合理范围。根据现场实测资料, 在补水后污染物浓度可达到IV类标准(见图10)。根据数据分析得出, 调控后非汛期水环境质量优于汛期, 汛期对TP、COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的削减率峰值分别为27.0%、8.3%、49.0%, 非汛期为29.5%、9.0%、52.4%。

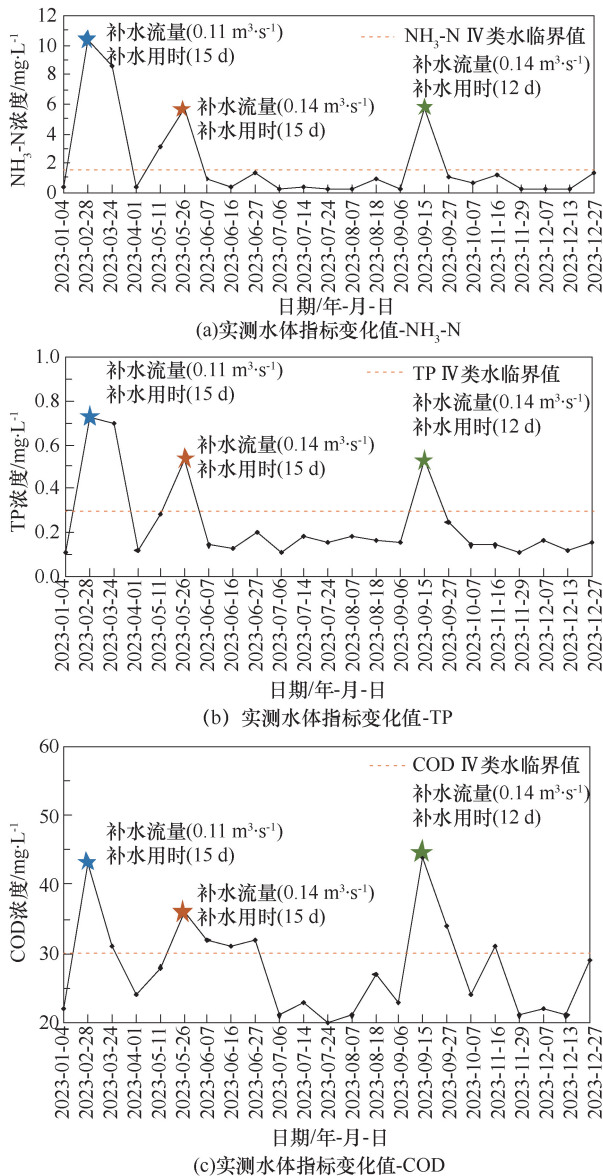


图10 污染物指标实测结果

Fig. 10 Measured results of pollutant indices

3.4 阈值体系应用

本文提出的生态修复需水阈值综合计算方法应用范围为缺少长系列水文数据资料、渠化型的城市河道, 结合水系连通、水质改善及水生生物生存要求, 确定生态修复需水目标值。在实际应用中, 需根据目标河段人类活动干扰程度及生态目标确定生态修复需水流量值。此外, 除了目前考虑的稀释自净、水系连通及水生生物等因素, 河流生态修复需水还受其他诸多因素影响, 例如河道形态、气候变化等因素, 在这些角度有待进一步深入研究。

4 结论

结合城市河道特征, 以马鞍山芦塘支渠为例, 在分析现有生态修复需水计算方法适用性的基础上, 考虑水生生物、水质需求、水系连通及景观等因素, 提出一种城市河道生态修复需水阈值的综合计算方法, 并采用湿周法进行改进验证计算结果的合理性, 主要结论如下。

(1) 针对缺乏城市河道长序列实测水文资料问题, 通过人为设定流量序列, 模拟河道水文参数与流量之间的关系, 可弥补这一不足。基于此, 提出一种适用于城市河道生态修复需水阈值的综合确定方法。

(2) 该方法以满足城市河道生态功能, 即水系连通、水质提升和水生生物生存为基础进行生态修复需水计算, 优点在于: 能够充分考虑维持城市河道特征及景观需求; 维护生物栖息地的完整性, 根据实测断面资料建立平均生态流速-平均生态水深与流量之间的关系便捷、灵活且易于管理流量调控, 可根据研究河段连通水位、水质要求来确定生态修复需水。

(3) 根据本文生态修复需水阈值计算结果对芦塘支渠进行调控设计, 在 $0.096\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.193\ \text{m}^3/\text{s}$ 及 $0.289\ \text{m}^3/\text{s}$ 三种工况下, 相比补水前水体流速分别提升 $0.002\ \text{m}/\text{s}$ 、 $0.003\ \text{m}/\text{s}$ 、 $0.005\ \text{m}/\text{s}$ 。汛期对TP、COD及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的削减率峰值分别为27.0%、8.3%、49.0%, 非汛期为29.5%、9.0%、52.4%。

参考文献 (References):

- [1] 祁晓红. 营口地区主要河流生态需水分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(3): 97-99.
QI X H. Analysis of ecological water requirements for major rivers in Yingkou Area[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(3): 97-99.
- [2] 刘昌明, 门宝辉, 赵长森. 生态水文学: 生态需水及其与流速因素的相互作用[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 765-774.
LIU Changming, MEN Baohui, ZHAO Changsen. Ecohydrology:

- Environmental flow and its driving factors [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 765-774.
- [3] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 138-150.
HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150.
- [4] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018 [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161.
- [5] XIA Chengcheng, LIU Guodong, MENG Yuchuan, et al. Impact of human activities on urban river system and its implication for water-environment risks; An isotope-based investigation in Chengdu, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, 27(5): 1416-1439.
- [6] ZHANG Xianqi, WANG Kai, WANG Tao. SWMM-Based assessment of the improvement of hydrodynamic conditions of urban water system connectivity [J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(13): 4519-4534.
- [7] WEI Huaibin, RAO Yiding, LIU Jing, et al. Impact on urban river water quality and pollution control of water environmental management projects based on SMS-Mike21 coupled simulation [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 6492-6492.
- [8] LUAN Guangxue, HOU Jingming, WANG Tian, et al. Research on hydrodynamic and water quality optimization scheduling based on optimization technology for complex of river network structures [J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(4): 1339-1358.
- [9] 管新建, 高丰, 孟钰, 等. 基于河流生态水量保护的南阳市白河流域生态补偿机制研究 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(10): 68-71.
GUAN Xinjian, GAO Feng, MENG Yu, et al. Research on ecological compensation mechanism of Baihe basin in Nanyang City based on river ecological flow protection [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(10): 68-71.
- [10] BERHANU B, BISRAT E. Alleviating water scarcity in the central rift valley lakes through an inter-basin water transfer, Ethiopia [J]. *Natural Resources*, 2020, 11(12): 554-568.
- [11] XU Qu, CHEN Yushun, LIU Han, et al. A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North water diversion project [J]. *Water Research*, 2020, 185(10): 116275-116288.
- [12] DAI Jiangyu, WU Shiqiang, WU Xiufeng, et al. Impacts of a large river-to-lake water diversion project on lacustrine phytoplankton communities [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587(19): 12938-12949.
- [13] ROLLASON E, SINHA P, BRACKEN L J. Interbasin water transfer in a changing world: A new conceptual model: [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2022, 46(3): 371-397.
- [14] 杜龙飞, 侯泽林, 李彦彬, 等. 城市河流生态需水量计算方法研究 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(2): 34-37.
DU Longfei, HOU Zelin, LI Yanbin, et al. Study on calculation method of ecological water demand of urban river [J]. *Yellow River*, 2020, 42(2): 34-37.
- [15] 孔令刚, 李萌萌, 郭文献, 等. 城市水系河流断面生态需水量研究 [J]. *水力发电*, 2020, 46(8): 6-9.
KONG Linggang, LI Mengmeng, GUO Wenxian, et al. Study on ecological water demand of river section in urban water system [J]. *Water Power*, 2020, 46(8): 6-9.
- [16] 陶洁, 乔文昭, 曹阳, 等. 沙颍河周口断面生态流量过程计算和分析 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(3): 97-102.
TAO Jie, QIAO Wenzhao, CAO Yang, et al. Calculation and analysis of ecological flow process at Zhoukou section of shaying river [J]. *Yellow River*, 2023, 45(3): 97-102.
- [17] 冯颖璇, 李怀恩, 成波, 等. 基于改进 IFIM 法的生态流量应用方法进展 [J]. *人民珠江*, 2022, 43(5): 21-29.
FENG Yingxuan, LI Huai en, CHENG Bo, et al. Development of ecological flow application method based on improved IFIM [J]. *Pearl River*, 2022, 43(5): 21-29.
- [18] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法: 以三峡水库及其坝下河段为例 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(6): 715-726.
WANG J N, DONG ZH R, LIAO W G, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2013, 43(6): 715-726.
- [19] 王中根, 赵玲玲, 陈庆伟, 等. 关于生态流量的概念解析 [J]. *中国水利*, 2020(15): 29-32.
WANG Zhonggen, ZHAO Lingling, CHEN Qingwei, et al. Analysis of the ecological flow concept [J]. *China Water Resources*, 2020(15): 29-32.
- [20] 丁启慧, 贾美蓉, 丁相毅, 等. 青海湖流域主要河流的生态需水 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(3): 575-584.
DING Q H, JIA M R, DING X Y, et al. Ecological water demand of major rivers in Qinghai Lake basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(3): 575-584.
- [21] 李芊芊, 张翔, 吴可怡, 等. 汉江下游流域生态流量区域特征指标的优选 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 282-290.
LI Q Q, ZHANG X, WU K Y, et al. Optimization of regional characteristic indicators for ecological flow in the lower reaches of Hanjiang River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 282-290.
- [22] 燕翔, 牛存稳, 贾仰文, 等. 基于曼宁公式的汾河生态系统服务价值研究 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(5): 927-936.
YAN X, NIU C W, JIA Y W, et al. Ecosystem service value of Fenhe River based on Manning formula [J]. *South-to-North Water*

- Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 927-936.
- [23] 张尚弘, 姜琪, 唐彩红, 等. 小浪底水库运行下花园口河段黄河鲤鱼生态流量研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(4): 151-162.
ZHANG Shanghong, JIANG Qi, TANG Caihong, et al. Study on the ecological flow of Yellow River carp in Huayuankou river reach under the regulation of Xiaolangdi Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 151-162.
- [24] YIN Xinan, YANG Zhifeng, ZHANG Enze, et al. A new method of assessing environmental flows in channelized urban rivers [J]. Engineering, 2018, 4(5): 590-596.
- [25] 李强, 王俏俏, 陈红丽, 等. 生态流量方法应用现状研究[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 36-46.
LI Qiang, WANG Qiaoqiao, CHEN Hongli, et al. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 36-46.
- [26] 高勋, 陈星, 卢娟娟, 等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 55-61.
GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 55-61.
- [27] 唐杰, 陈垚, 程麒铭, 等. 河道形态改造对城市河流生态水力性能的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 185-193.
TANG Jie, CHEN Yao, CHENG Qiming, et al. Influence of river course form transformation on ecological hydraulic performance of urban rivers[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 185-193.
- [28] 魏桢, 贾海峰, 姜其贵, 等. 再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6540-6546.
WEI Zhen, JIA Haifeng, JIANG Qigui, et al. Simulation experiment of phytoplankton growth induced by flow velocity in rivers replenished with reclaimed water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6540-6546.
- [29] 曹琛洁, 徐志婧, 龙怡静, 等. 流速对再生水补水的景观水体藻类水华的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 65-69.
CAO Chenjie, XU Zhiqiang, LONG Yijing, et al. Effect of flow velocity on algal bloom in landscape water replenished with reclaimed water[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 65-69.
- [30] 李咏红, 刘旭, 李盼盼, 等. 基于不同保护目标的河道内生态需水量分析: 以琉璃河湿地为例[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4393-4403.
LI Yonghong, LIU Xu, LI Panpan, et al. Analysis of ecological water requirement of rivers for different purposes: The case of Liuli River [J]. Environmental Engineering, 2018, 38(12): 4393-4403.
- [31] 史方方, 黄薇. 用改进湿周法计算河道内最小生态流量[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(4): 9-12.
SHI Fangfang, HUANG Wei. Minimum instreaming ecological discharge by using improved wetted perimeter method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(4): 9-12.
- [32] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量: 以滦河水系为例[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 287-291.
JI Lina, LIU Suxia, WANG Xinchun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: A case study in Luanhe water system[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 287-291.
- [33] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 湿周法的改进和应用[J]. 水利水电技术, 2007(10): 10-13.
SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Application and improvement of wetted perimeter method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(10): 10-13.

(责任编辑 王璐)